

ESCORRIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS SMA COM USO DE LÃ DE VIDRO COMO ADITIVO ESTABILIZANTE

Luiz Carlos Brocca Blasius (1), Joe Arnaldo Villena Del Carpio (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)luiz.brocca@outlook.com, (2)joevillena@gmail.com

RESUMO

As misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt – SMA apresentam granulometria descontínua e uso de fibras com a finalidade de estabilizar as misturas frente ao fenômeno de escorrimento. Atualmente, o aditivo estabilizante mais utilizado é a fibra de celulose; no entanto, não é descartada a possibilidade de uso de outro tipo de fibras para esta finalidade. A presente pesquisa consiste no estudo da viabilidade do uso de lã de vidro, resíduo da construção civil, como aditivo estabilizante nas misturas tipo SMA. Para tal, foram moldadas misturas tipo SMA com adição de 0,3, 0,5 e 0,7% de fibra de lã de vidro e fibra de celulose. O ensaio de escorrimento Schellenberg foi utilizado para definir o teor ótimo de fibra a ser utilizado nas misturas de modo que o escorrimento no final do ensaio fosse menor a 0,3%, definido por Norma. Os resultados foram comparados com outros tipos de adição de fibras presentes na literatura. Os resultados deste ensaio mostraram que o teor ótimo de adição de fibra de lã de vidro e de fibra de celulose para o mesmo tipo de mistura SMA foi de 0,40 e 0,44% respectivamente. A partir destes resultados, pode-se afirmar que a lã de vidro se apresenta como uma ótima alternativa ao uso de fibra de celulose como aditivo estabilizante de misturas asfálticas tipo SMA. Adicionalmente, um benefício ambiental pode ser atingido devido à possibilidade de uso deste tipo de fibras, as quais representam um subproduto da indústria da construção civil e que, geralmente, não tem uma política adequada de descarte e gestão.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, SMA, lã de vidro, fibra de celulose, escorrimento.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira possui um total de 1.720.643,20 km de rodovias das quais 210.618,80 são pavimentadas, sendo que esse modal tem a participação de 61,10% de toda a movimentação anual de cargas e passageiros (CNT, 2015). Com essa grande fatia de participação, torna-se cada vez mais importante que um pavimento atenda aos requisitos de alta durabilidade, alta segurança em pista molhada e conforto aos usuários.

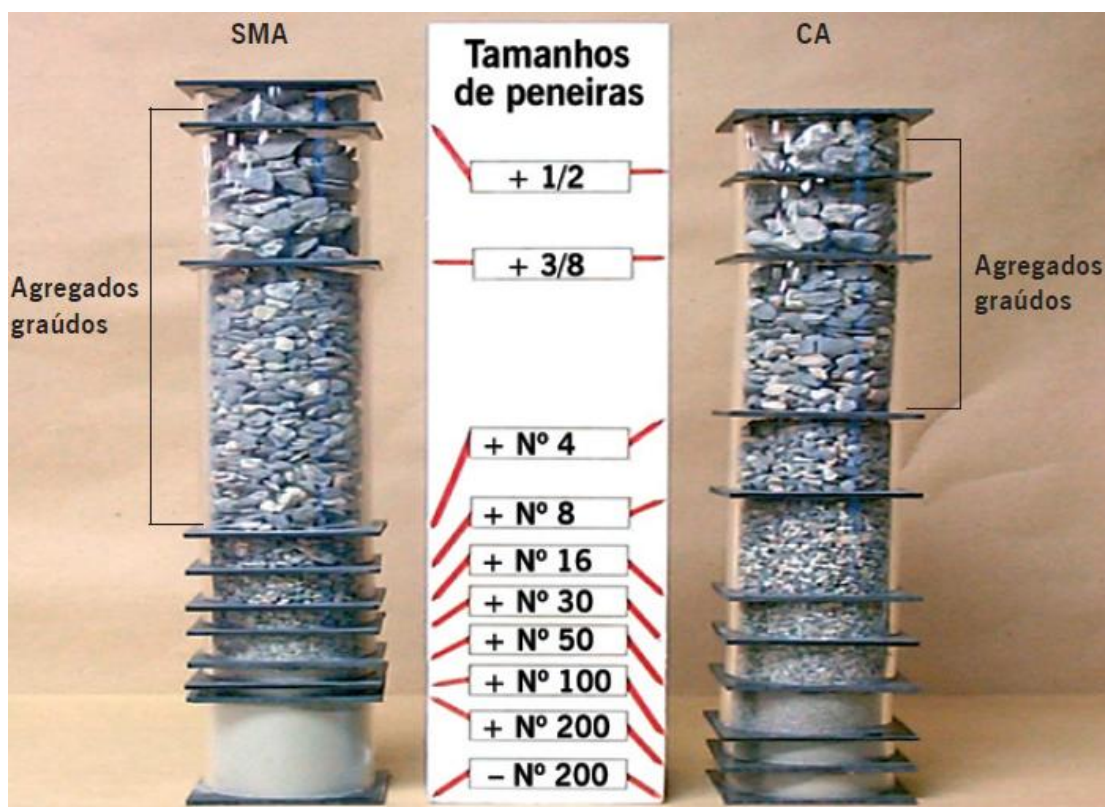
Conforme Silva (2005), com as técnicas utilizadas atualmente, os pavimentos das rodovias brasileiras não têm atendido aos requisitos de alta resistência e alta durabilidade, no caso de pavimentos para alto volume de tráfego, apresentando

problemas como trincas por fadiga, afundamentos nas trilhas de rodas e desagregação do revestimento de forma precoce. Uma alternativa aos problemas apresentados nos pavimentos das rodovias do Brasil são as misturas tipo SMA.

Conforme Silva (2005), as misturas SMA (*Stone Matrix Asphalt* nos EUA e *Stone Mastic Asphalt* na Europa), foram desenvolvidas na Alemanha para resolver o problema de desgaste excessivo dos pavimentos gerados pelos pinos metálicos instalados nos pneus dos carros a fim de promover maior aderência do veículo a pista durante os períodos de inverno.

A mistura SMA consiste em uma mistura asfáltica usinada a quente com distribuição granulométrica descontínua, composta por uma grande quantidade de agregados graúdos (entre 70% e 80% retido na peneira número 10), sendo os vazios preenchidos por uma argamassa (também chamada de mástique) formada por ligante, fração de areia, filer e aditivo estabilizante (fibras). A Figura 1 mostra um comparativo entre uma mistura SMA e um concreto asfáltico convencional (CA).

Figura 1 - Comparativo da composição granulométrica de uma mistura tipo SMA e uma mistura de concreto asfáltico (CA).



Fonte: Tuchumantel (2008)

Não existem restrições quanto ao tipo de ligante asfáltico usado em misturas SMA, mas por se tratar de uma mistura de alto desempenho, os asfaltos modificados são preferencialmente usados (Leal, 2012). Os ligantes modificados são comumente utilizados para garantir ainda menor deformação permanente e maior vida de fadiga (Reis et al, 2002).

Devido à graduação que apresenta e à alta concentração de agregados graúdos, as misturas do tipo SMA têm uma macrotextura rugosa, formando pequenos “canais” entre os agregados graúdos, responsáveis por uma drenagem superficial eficiente (Vale, 2005). Na Figura 2, pode-se observar a textura final de um pavimento utilizando uma mistura SMA.

Figura 2 - Textura final de uma mistura SMA



Fonte: Tuchumantel (2008)

O esqueleto formado pelos agregados graúdos, maximiza o contato entre os grãos, proporcionando uma excelente resistência a deformação permanente. O mástique, rico em ligante preenchendo os vazios da mistura, proporciona maior durabilidade da mistura asfáltica (Vale, 2005).

O aditivo estabilizante tem a função de evitar a segregação da mistura e evitar o escorrimento do ligante asfáltico, sendo que a fibra de celulose pura tem maior poder de absorção para evitar escorrimento do ligante (Tuchumantel, 2013).

Além da fibra de celulose, vários outros tipos de fibras (minerais e orgânicas) têm sido testadas nas misturas SMA, como fibra de coco (Vale, 2005) e bagaço de cana de açúcar (Leal, 2012).

Um outro produto que poderia ser utilizado como aditivo estabilizante para as misturas SMA é a lã de vidro, a qual é muito utilizada em obras de grande porte, para revestimento dos dutos de ar condicionado e acaba tornando-se um resíduo da construção civil sem destinação adequada. Sendo assim, torna-se necessária a pesquisa de um destino adequado desse material. Por sua natureza fibrosa, este material poderia ser utilizado, na dosagem de misturas SMA, como aditivo substituto para as fibras comumente utilizadas, mencionadas anteriormente.

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a efetividade do uso de lã de vidro como aditivo estabilizante nas misturas asfálticas tipo SMA. Esta verificação será satisfatória caso as misturas dosadas com lã de vidro consigam atender aos requisitos de aceitação citados na Especificação Técnica ET-DE-P00/031 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da presente pesquisa consiste na dosagem de misturas asfálticas SMA com ligante CAP 50/70, agregados pétreos e dois tipos de fibras a serem utilizadas como aditivos estabilizantes: fibra de celulose e lã de vidro. Os resultados da dosagem das misturas com adição de fibra de celulose e com adição de lã de vidro serão comparados entre si e com outros tipos de adições a fim de verificar a efetividade técnica do uso da última como material constituinte das misturas SMA.

2.1. MATERIAIS EMPREGADOS

2.1.1. Agregados

Os agregados utilizados na pesquisa são de origem basáltica, provenientes da pedreira Cedro, localizada no município de Maracajá, as margens da BR-101, no km 401. A Figura 3 mostra a localização da jazida.

Figura 3 - Localização da jazida.



Fonte: Google Maps (2016)

Conforme estabelece a especificação técnica ET-DE-P00/031 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, os agregados graúdos foram submetidos aos ensaios de desgaste Los Angeles conforme DNER ME 089/94, ensaio de índice de forma conforme ABNT NBR 7809 e ensaio de avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio conforme DNER ME 089/94.

Conforme a mesma norma, os agregados miúdos podem constituir-se por areia, pó de pedra ou mistura de ambos. Devem apresentar partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. O equivalente de areia obtido conforme NBR 12052 deve ser igual ou superior a 55%.

Para material de enchimento (fíler) foi utilizado a cal hidratada, sendo que a granulometria foi verificada, atendendo a especificação técnica do DER de São Paulo. A Figura 4 apresenta os agregados utilizados na mistura ensaiada: brita 3/4", pó de pedra e cal hidratada.

Figura 4 - Agregados utilizados na mistura



Fonte: Do Autor (2016)

2.1.2. Fibra de Celulose

A fibra empregada na pesquisa foi a TOPCEL, fornecida pela empresa Betunel. A fibra é fornecida pura, na forma de “pellets”. Na Tabela 1 são mostradas as características da fibra utilizada. A Figura 5 apresenta a fibra de celulose utilizada na pesquisa.

Tabela 1 - Resultados de testes em amostra da fibra TOPCEL.

Características das fibra de celulose	Resultados obtidos
Comprimento médio dos pellets	2-8mm
Diâmetro médio dos pellets	$4 \pm 1\text{mm}$

Fonte: Do Autor (2016)

Figura 5 - Fibra de celulose em forma de "pellets"



Fonte: Do Autor (2016)

2.1.3. Lã de Vidro

A lã de vidro empregada na pesquisa é proveniente de resíduos da construção civil. A lã é da marca Saint Gobain, sendo que foi feita uma análise visual para verificação de impurezas e a seguir foi feito o peneiramento afim de desagregação dos fios, utilizando a peneira N°5. Na Figura 6 é apresentada a lã utilizada na pesquisa.

Figura 6 - (a) Lã de vidro na forma "bruta", e (b) lã de vidro desagregada



(a)

(b)

Fonte: Do Autor (2016)

2.1.4. Ligante Asfáltico

Na pesquisa foi utilizado o ligante asfáltico CAP 50/70 e for fornecido pela Greca Asfaltos, empresa localizada em Esteio - RS. A Figura 7 mostra o ligante asfáltico utilizado na pesquisa. As características do ligante podem ser vistas na Tabela 2.

Figura 7 - Ligante Asfáltico CAP 50/70



Fonte: Do Autor (2016)

Tabela 2 - Características do CAP 50/70

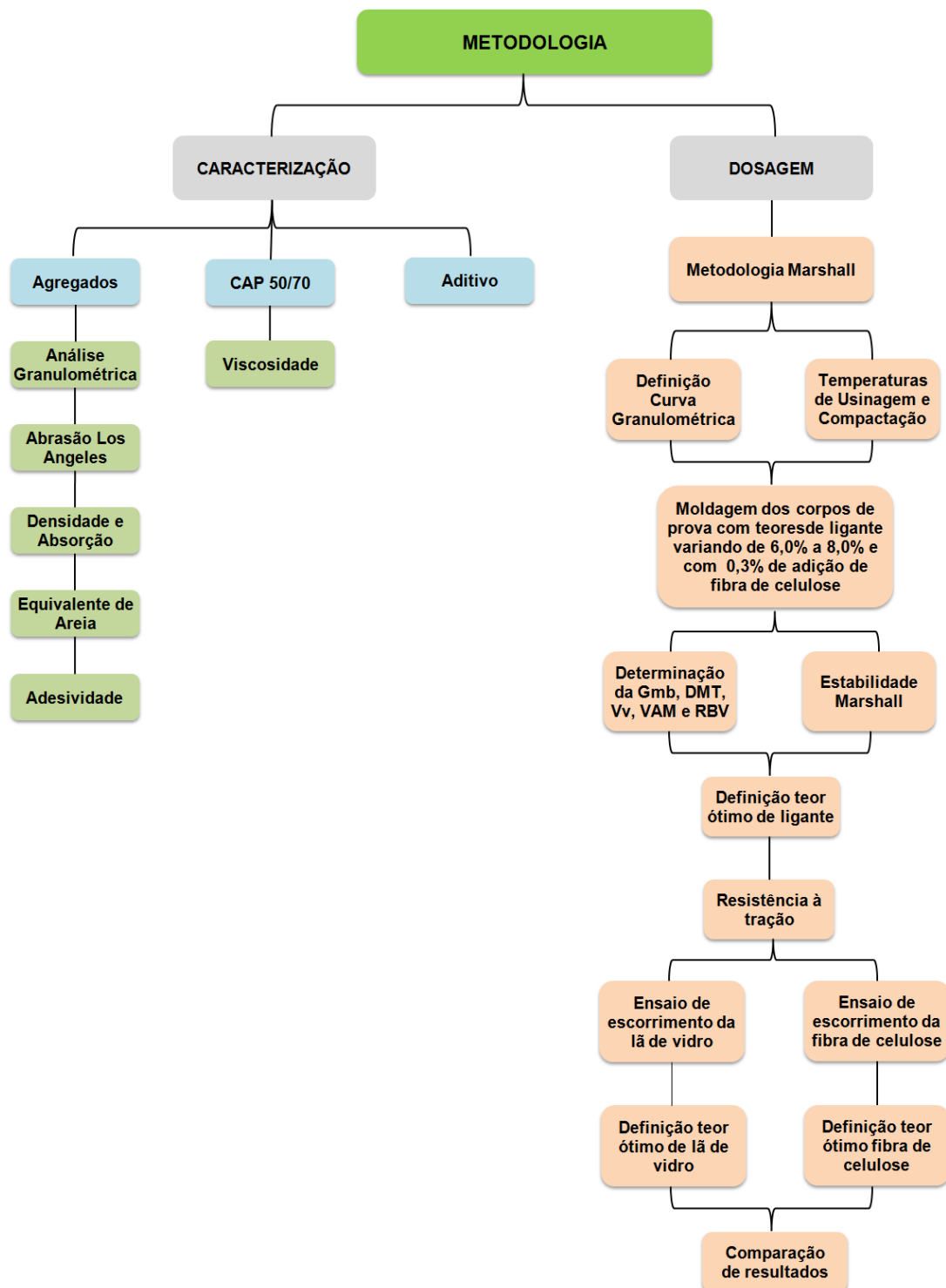
Característica	Unidade	ABNT	Especificação
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR-6576	50 a 70
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR-6560	46
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR-11341	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	NBR-14855	99,5
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	NBR-6293	60
Ductilidade a 25°C, mín.		NBR-6293	20
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR-6560	8
Penetração retida, mín.	%	NBR-6576	55

Fonte: Greca Asfaltos (2016) adaptado

2.2. METODOLOGIA

As etapas que compuseram essa pesquisa estão detalhadas no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma da Metodologia



Fonte: Do Autor (2016)

2.2.1. Definição da Curva Granulométrica

Por ser um tipo de mistura asfáltica muito utilizada em diversas partes do globo, o SMA possui diversas especificações. No Brasil o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, tem publicada a especificação técnica ET-DE-P00/031, que baseada nas normas argentina e alemã, apresenta quatro composições da mistura asfáltica, conforme Tabela 3.

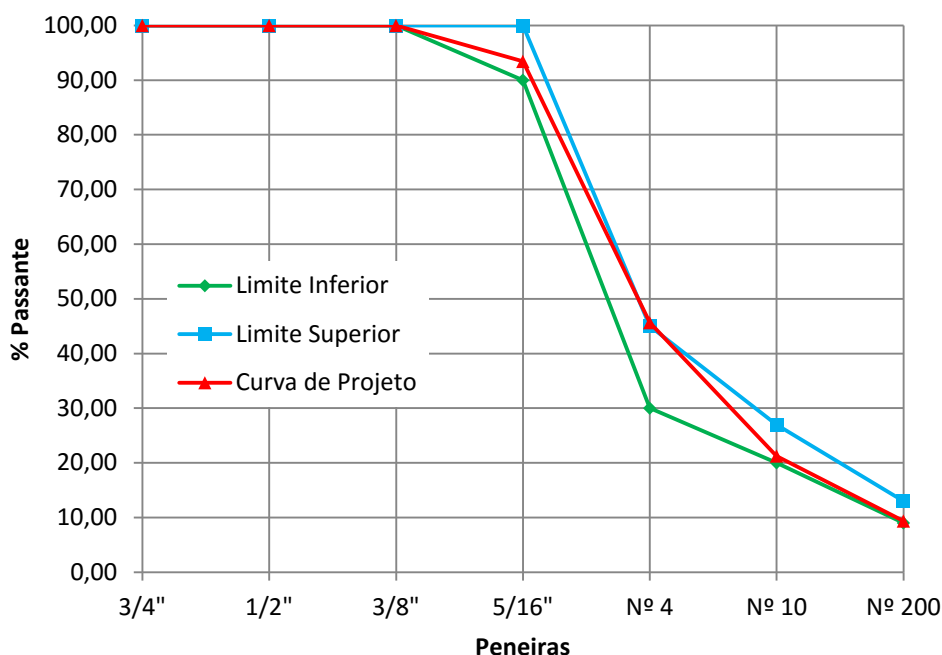
Tabela 3 - Faixas de trabalho para misturas SMA

Peneira de Malha		Designação				Tolerâncias
Quadrada		I	II	III	IV	
ASTM	mm	% em Massa, Passando				
3/4"	19,0	100				
1/2"	12,5	90-100				± 7%
3/8"	9,5	-	100	100		± 7%
5/16"	7,93	45-60	90-100	90-100	100	± 5%
Nº 4	4,8	30-40	30-45	30-52	90-100	± 5%
Nº 10	2,0	20-27	20-27	20-30	30-40	± 5%
Nº 200	0,075	9-13	9-13	7-12	7-12	± 2%
Espessura (cm)		3,5 - 5,0	3,0 - 4,0	2,5 - 3,5	1,5 - 2,5	

Fonte: Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

Após análise de diversos estudos já publicados, optou-se por utilizar na pesquisa a faixa II da ET-DE-P00/031, visando a comparação de resultados. Com a definição da faixa de trabalho do SMA foi elaborada a curva granulométrica conforme a Figura 9.

Figura 9 - Curva granulométrica



Fonte: Do Autor (2016)

Definida a curva granulométrica, os agregados foram peneirados e separados por peneiras, pesando-se cada fração para preparar as misturas uma a uma, respeitando a curva de projeto obtida.

2.2.2. Definição das Temperaturas de Usinagem e Compactação

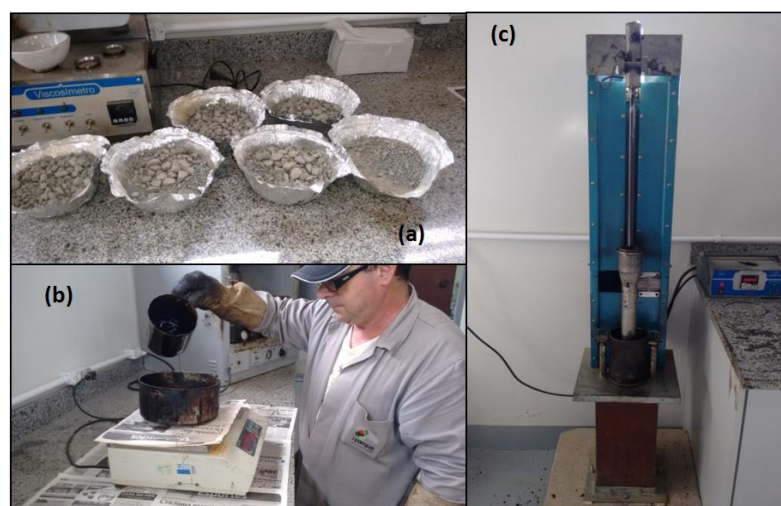
As temperaturas de usinagem e compactação foram determinadas por meio da curva viscosidade-temperatura, obtida a partir do ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol. Para a temperatura de usinagem foram utilizados os limites de 75 a 95 SSF. Já para a temperatura de compactação foram utilizados os limites de 125 a 155 SSF.

2.2.3. Dosagem da Mistura Asfáltica

A dosagem da mistura asfáltica foi realizada por meio da metodologia Marshall, conforme NBR 12891, utilizando 50 golpes por face. Para tal foram moldados três corpos de prova para cada teor, sendo que foram adotados teores de 6,0; 6,5; 7,0;

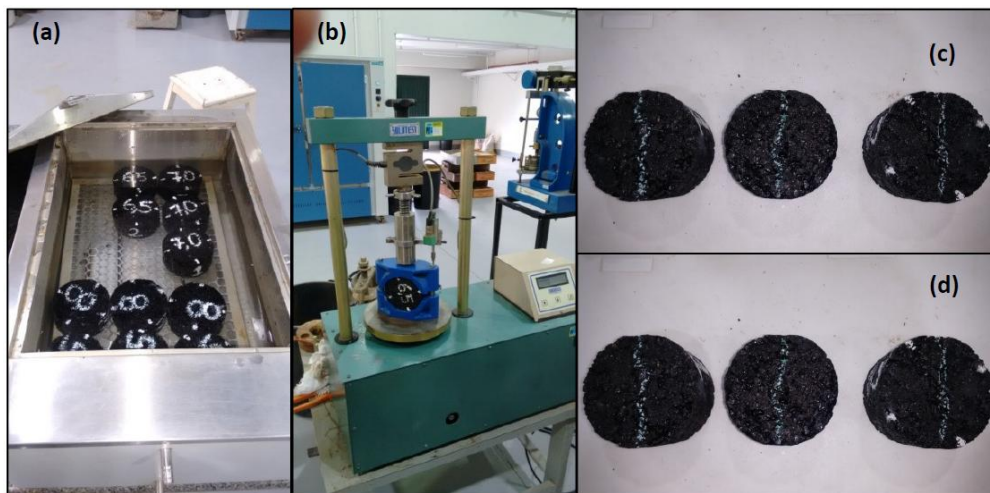
7,5 e 8,0% de CAP 50/70. Afim de simular uma mistura SMA convencional, foi adicionada em cada mistura uma fração de 0,3% em massa de fibra de celulose. O teor ótimo de ligante foi obtido com base na especificação técnica do DER-SP onde a mesma indica um percentual de vazios totais de 4% e percentual de vazios do agregado mineral (VAM) maior ou igual a 17%. A Figura 10 e a Figura 11 mostram o procedimento de moldagem dos corpos de prova e também o procedimento de ensaio para obtenção do valor da estabilidade Marshall.

Figura 10 - Moldagem de corpos de prova a partir da metodologia Marshall. (a) Agregados antes da adição do ligante (b) Adição de teor de ligante para uma mistura com 1200g (c) Compactação com compactador Marshall



Fonte: Do Autor (2016)

Figura 11 - Ensaio Estabilidade Marshall. (a) Corpos de prova imersos em água (b) Rompimento dos corpos de prova (c) e (d) Linha de ruptura dos corpos de prova



Fonte: Do Autor (2016)

2.2.4. Resistência à Tração da Mistura Asfáltica

Após a determinação do teor ótimo de ligante, foram moldados três corpos de prova afim de obter o valor de resistência a tração da mistura. O ensaio foi realizado conforme a NBR 15087, sendo que o valor mínimo de resistência exigido pelo DER-SP é 0,6 MPa. A Figura 12 mostra o ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

Figura 12 - Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral



Fonte: Do Autor (2016)

2.2.5. Ensaio de Escorrimento Schellenberg

Com o procedimento Marshall devidamente finalizado, passou-se para a etapa de definição do teor ótimo de fibras na mistura. A Especificação Técnica do DER-SP especifica três tipos de ensaios para determinação do escorrimento do ligante asfáltico e consequente determinação do percentual de fibras: ASTM D 9690, AASHTO T 305 ou Ensaio de Schellenberg.

Para essa pesquisa foi adotado o Ensaio de Schellenberg indicado na norma europeia EN 12697-18, que consiste na inserção de 1000g da mistura asfáltica em um Becker previamente tarado. O conjunto é colocado em uma estufa pelo período de uma hora a temperatura de compactação. Transcorrido esse intervalo de tempo o Becker é virado com a base para cima por um tempo de 10 (dez) segundos. O Becker é então pesado novamente juntamente com o material que ficou retido em suas paredes.

Após a pesagem final do Becker o mesmo foi submetido a lavagem com percloroetileno e as partículas de agregados que ficaram retidas no Becker juntamente com o ligante foram descontadas, quando necessário, conforme estabelece a norma europeia EN 12697-18. As porcentagens de material escorrido (E) e de material retido (R) são obtidas através da Equação 1 e da Equação 2.

$$E = 100 * \frac{(m_1 - m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)}$$

Equação 1

e

$$R = 100 * \frac{m_4}{(m_2 - m_1)}$$

Equação 2

onde: E – porcentagem de material escorrido no Becker (%);

R – porcentagem de agregado retido após a lavagem (%);

m_1 – valor da massa inicial do Becker (g);

m_2 – valor da massa inicial do Becker mais a amostra de mistura (g);

m_3 – valor da massa inicial do Becker mais o material retido após virar o Becker (g);

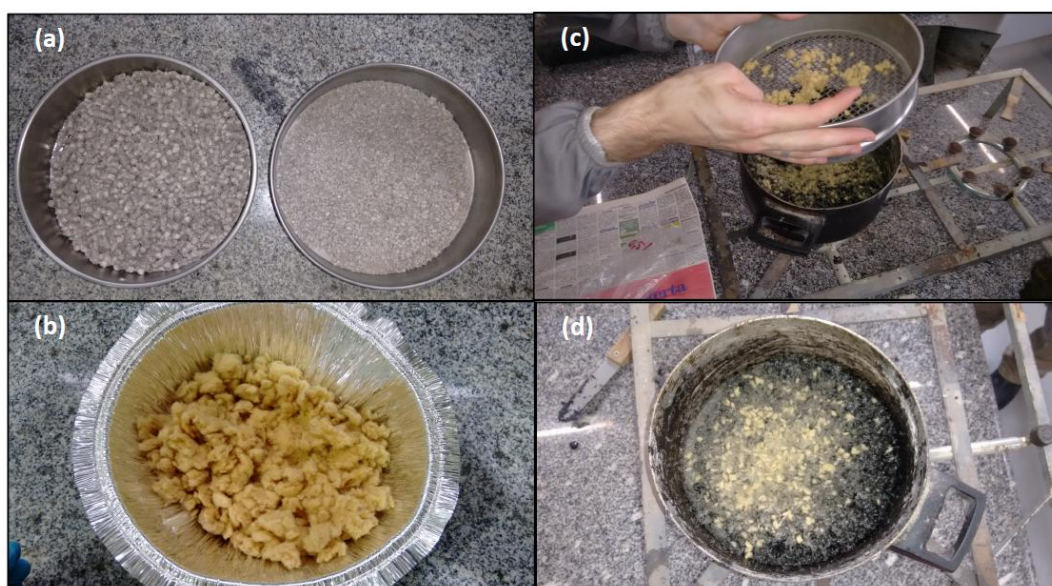
m_4 – valor da massa do material seco retido na peneira após a lavagem (g).

O ensaio de escurimento foi realizado para porcentagens de fibra de 0,3; 0,5 e 0,7% em massa, sendo que para cada teor foram feitos dois testes e o resultado do escurimento é a média aritmética dos ensaios. Tais porcentagens foram adotadas tomando como base trabalhos já publicados onde essa mesma faixa foi aplicada.

Devido ao pequeno volume de amostra indicada na norma, optou-se por desagregar tanto a fibra de celulose quanto a lã de vidro afim de promover uma melhor distribuição do material na amostra.

A fibra de celulose foi misturada em duas etapas, de forma manual, durante o processo de homogeneização da mistura. A lã de vidro por ter certa tendência a formar grumos, foi peneirada sobre o recipiente de mistura, para assim como a celulose, promover uma melhor distribuição na mistura. A Figura 13 mostra as fibras desagregadas e o processo de adição da lã de vidro a mistura.

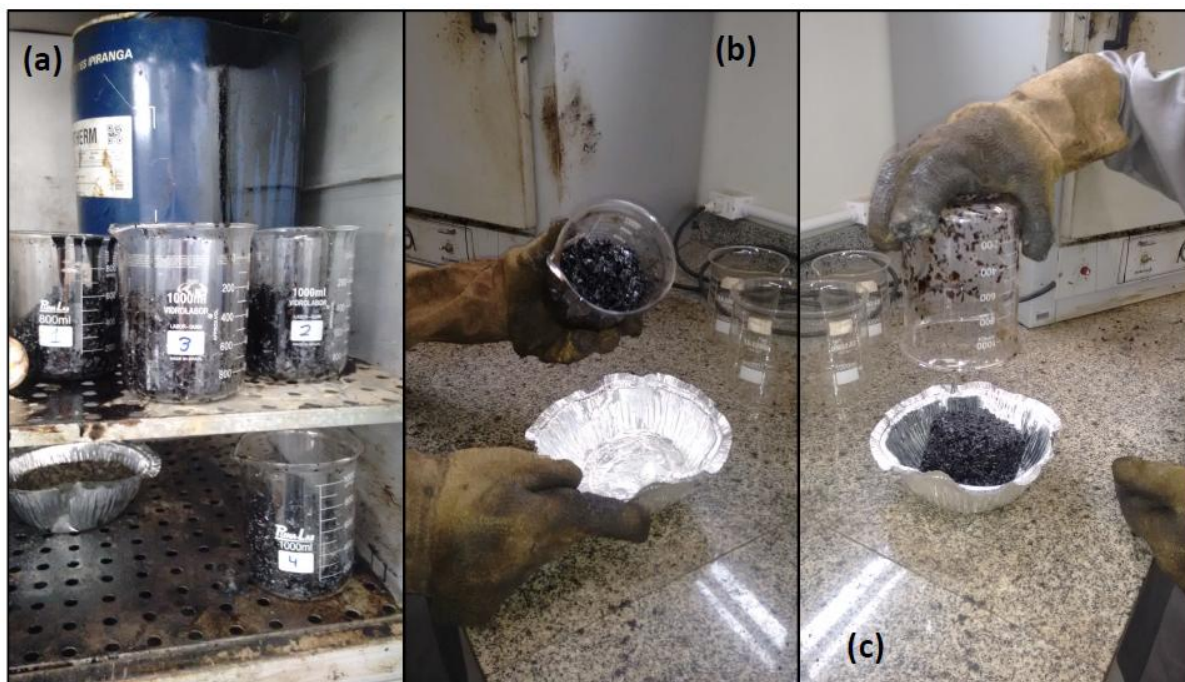
Figura 13 - Preparação das amostras para ensaio de escurimento. (a) Fibra de celulose antes e depois da desagregação (b) Lã de vidro após a desagregação (c) Peneiramento da lã de vidro sobre a mistura (d) Lã de vidro já peneirada.



Fonte: Do Autor (2016)

Após a mistura, as amostras foram submetidas ao ensaio de escoamento conforme detalhado anteriormente. A Figura 14 mostra o procedimento de ensaio.

Figura 14 - Ensaio de Escoamento Schellenberg. (a) Amostras na estufa (b) Becker logo após retirada da estufa (c) Becker com a base para cima durante o ensaio



Fonte: Do Autor (2016)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO

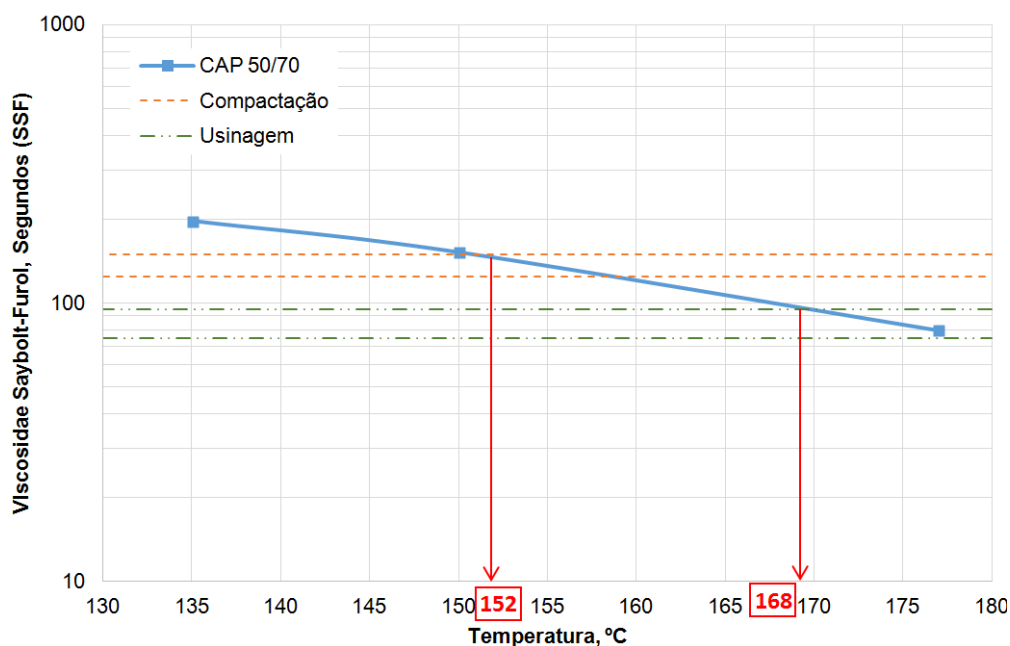
As temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica foram determinadas a partir do gráfico viscosidade x temperatura do ligante asfáltico. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos no ensaio de viscosidade Saybolt-Furol. A Figura 15 apresenta o gráfico gerado a partir dos resultados do ensaio de viscosidade. Já na Tabela 5 são apresentadas as temperaturas de compactação e usinagem para a mistura.

Tabela 4 - Resultado médio do teste de viscosidade Saybolt-Furol

Ensaio	Temperatura (°C)		
	135	150	177
Resultado Médio (SSF)	198	153	80

Fonte: Do Autor (2016)

Figura 15 - Gráfico Viscosidade x Temperatura



Fonte: Do Autor (2016)

Tabela 5 - Temperaturas de trabalho

Temperatura de usinagem, °C	168
Temperatura de compactação, °C	152

Fonte: Do Autor (2016)

3.2. DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Os resultados dos ensaios para determinação do teor ótimo de asfalto estão detalhados na Tabela 6.

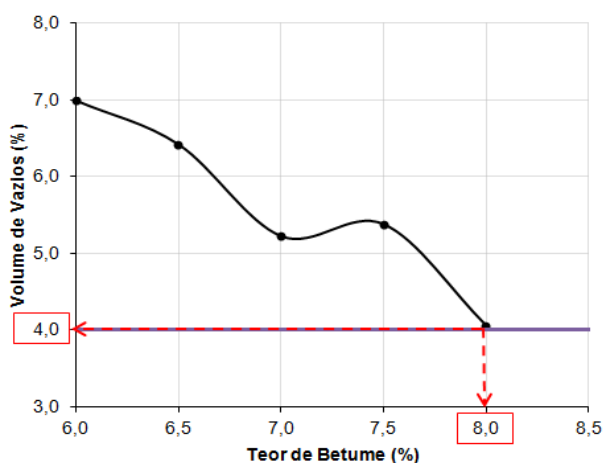
Tabela 6 - Resultados da dosagem Marshall

Teor de Ligante, %	Gmb, g/cm ³	DMT, g/cm ³	Vv, %	VAM, %	RBV, %	Estabilidade, kg
6,0	2,461	2,646	7,0	21,5	67,5	576,59
6,5	2,455	2,624	6,4	22,1	70,9	454,79
7,0	2,466	2,602	5,2	22,2	76,5	518,32
7,5	2,442	2,581	5,4	23,3	76,9	497,42
8,0	2,446	2,559	4,4	23,6	81,3	504,34

Fonte: Do Autor (2016)

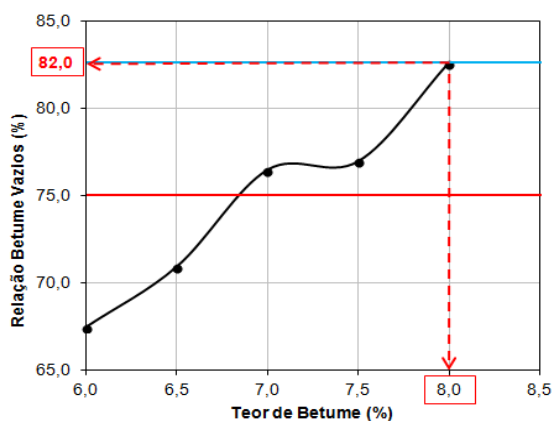
A partir dos dados apresentados na Tabela 6, foram obtidos os gráficos mostrados nas figuras 16, 17, 18, 19 e 20.

Figura 16 - Teor de betume x Volume de vazios



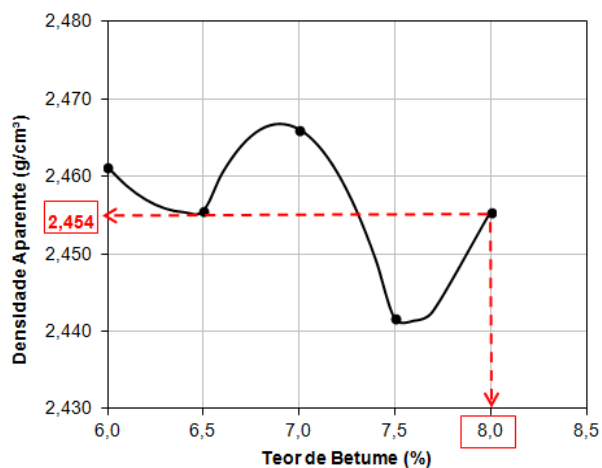
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 17 - Teor de betume x RBV



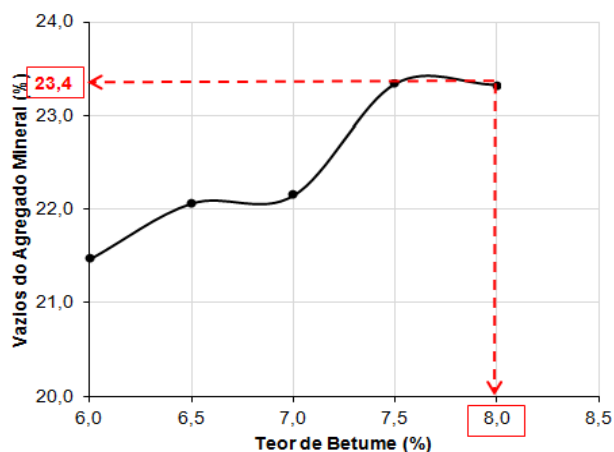
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 18 - Teor de betume x Densidade aparente



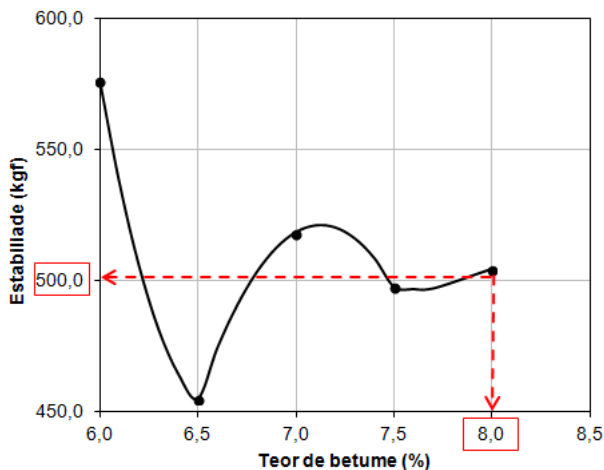
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 19 - Teor de betume x VAM



Fonte: Do Autor (2016)

Figura 20 - Teor de betume x Estabilidade



Fonte: Do Autor (2016)

A partir da análise do gráfico Volume de Vazios x Teor de ligante obteve-se o teor ótimo de ligante, estimado de 8%. Este teor de ligante pode parecer exagerado considerando que o teor ótimo de ligante para misturas de granulometria densa varia, geralmente, entre 5 a 6%. No entanto, na mistura utilizada neste estudo, alguns fatores podem estar associados ao alto teor de ligante; entre eles, o fator mais importante pode ser o alto teor de material fino presente na mistura SMA necessário para formar o mástique.

Numa mistura asfáltica de granulometria densa como por exemplo aquela que corresponde à Faixa C do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), o teor de material fino passante pela peneira # 200 é de aproximadamente 5%. Já na mistura SMA estudada o teor de material fino passante pela referida peneira é de aproximadamente 10%. Estas partículas finas possuem uma elevada área específica e por tanto precisam de uma elevada quantidade de ligante para se constituírem como mistura asfáltica.

3.3.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

Definido o teor ótimo de ligante em 8,0%, foram moldados cinco corpos de prova com adição de 0,3% de fibra de celulose, para realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à tração

Amostra	σ MPa	$\sigma_{\text{média}}$ MPa
1	0,93	0,91
2	0,96	
3	0,86	
4	0,87	
5	0,93	

Fonte: Do Autor (2016)

A especificação técnica do DER-SP, adotada como referência na pesquisa, determina que a resistência por compressão diametral da mistura deve ser superior a 0,6MPa. Analisando os resultados pode-se observar que todas as amostras atenderam tal requisito sendo o valor médio igual a 0,91 MPa.

Durante o ensaio observou-se que as amostras não apresentaram fissuras aparentes, conforme mostrado na Figura 21. Tal comportamento pode, talvez, ser explicado por um eventual comportamento dúctil do mástique formado pela grande quantidade de ligante aplicada na mistura, as fibras e os agregados finos.

Figura 21 - Amostras após ensaio de resistência à tração



Fonte: Do Autor (2016)

3.4. ENSAIO DE ESCORRIMENTO SCHELLENBERG

Com o teor ótimo de ligante obtido e a resistência a tração satisfatória, foram feitos os ensaios de escorrimento para teores de 0,3; 0,5 e 0,7% de aditivo estabilizante. Além destes, foi submetido ao ensaio duas amostras sem a adição de aditivo.

Afim de comparação de resultados foi realizado o ensaio de escorrimento para uma mistura sem a adição de fibras. Os resultados podem ser verificados nas figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Figura 22 - Escorrimento de amostra sem aditivo estabilizante



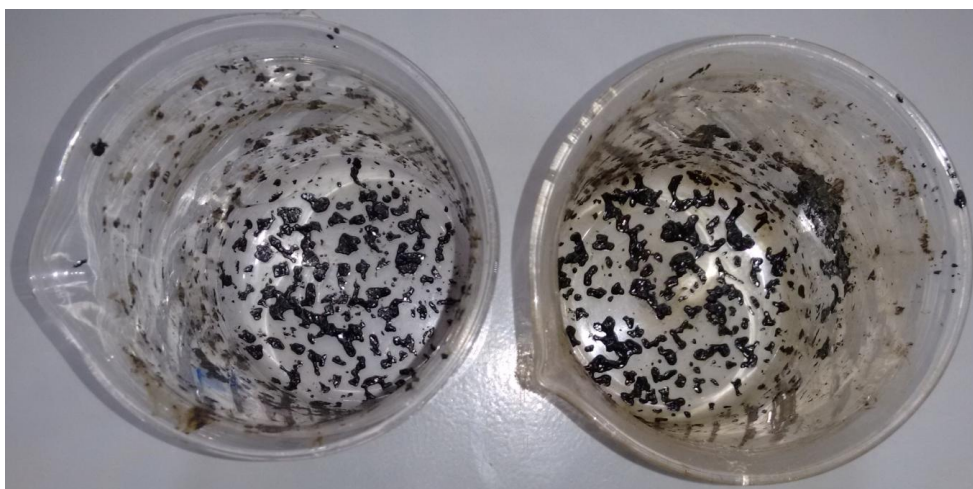
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 23 - Escorrimento de amostra com 0,3% de fibra de celulose



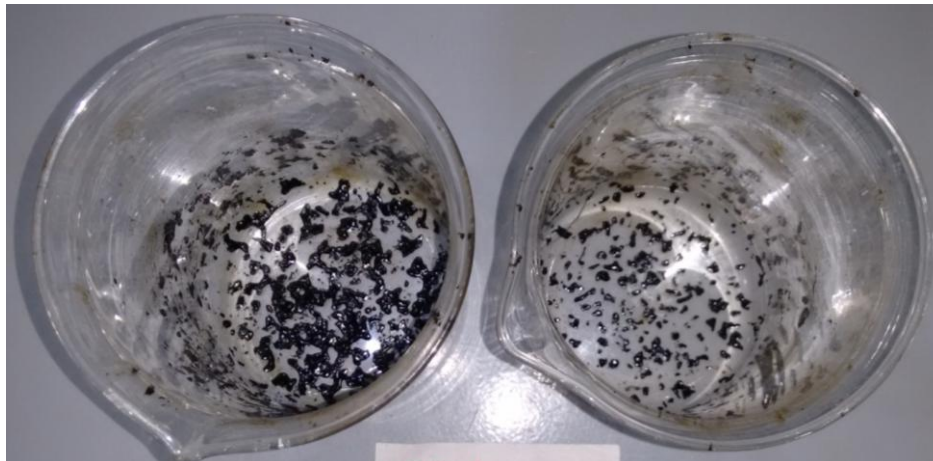
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 24 - Escorrimento de amostra com 0,5% de fibra de celulose



Fonte: Do Autor (2016)

Figura 25 - Escorrimento de amostra com 0,7% de fibra de celulose



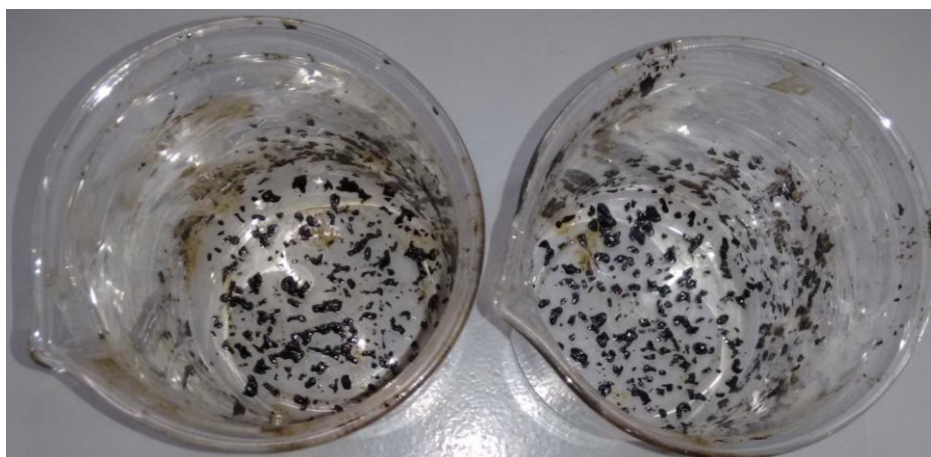
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 26 - Escorrimento de amostra com 0,3% de lã de vidro



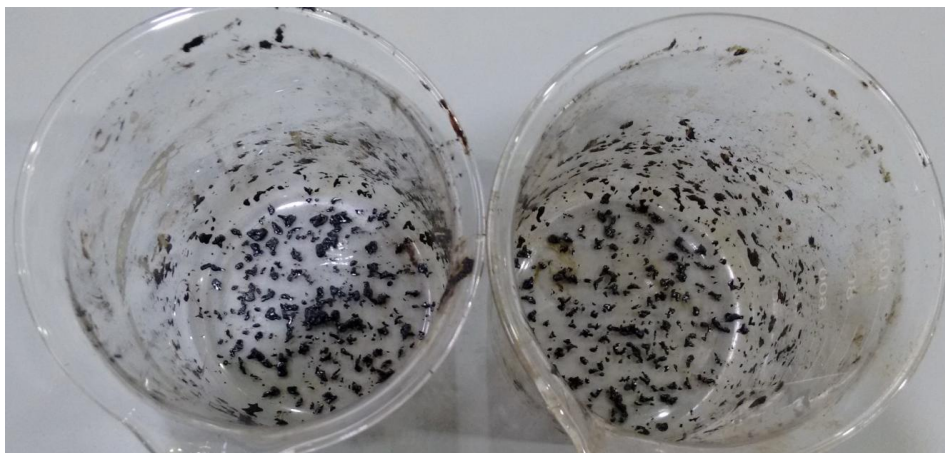
Fonte: Do Autor (2016)

Figura 27 - Escorrimento de amostra com 0,5% de lã de vidro



Fonte: Do Autor (2016)

Figura 28 - Escorrimento de amostra com 0,7% de lã de vidro



Fonte: Do Autor (2016)

Com os ensaios de escoamento devidamente realizados, os dados obtidos foram tabulados podendo assim obter-se os percentuais de escoamento para as misturas; os resultados são apresentados na Tabela 8.

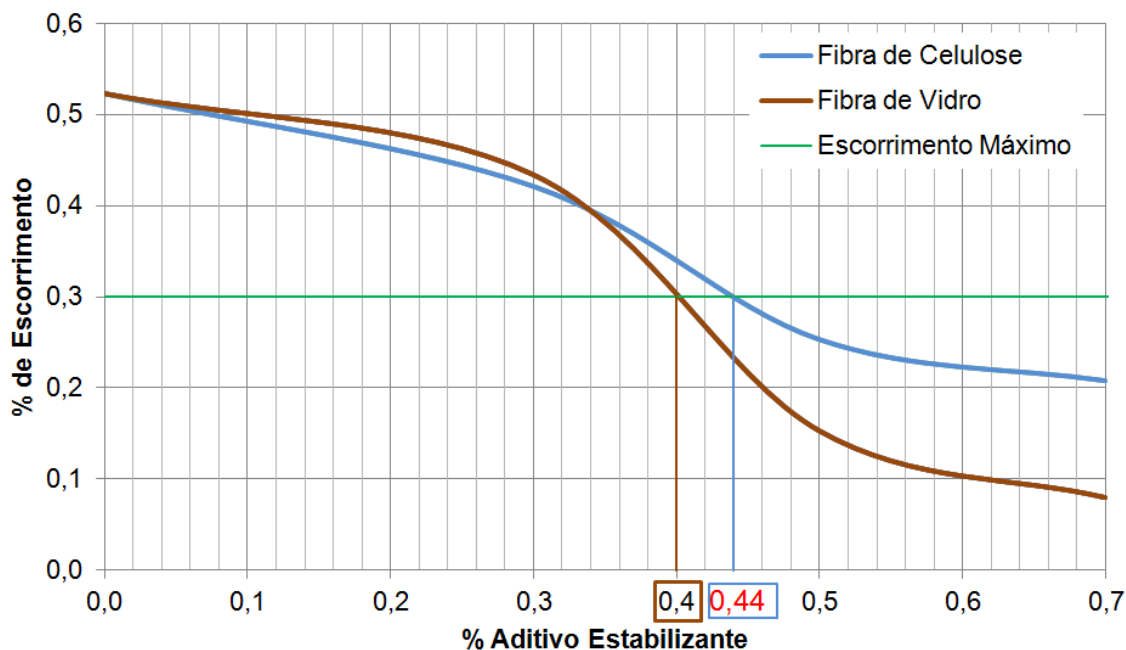
Tabela 8 - Resultados do ensaio de escoamento Schellenberg

<i>Tipo de Adição</i>	<i>% de Adição</i>	<i>Escoamento (%)</i>	<i>Média (%)</i>
Sem adição	0,00	0,60	0,52
		0,45	
Celulose	0,30	0,37	0,42
		0,48	
	0,50	0,18	0,25
		0,32	
	0,70	0,11	0,21
		0,31	
Lã de Vidro	0,30	0,40	0,43
		0,47	
	0,50	0,19	0,15
		0,12	
	0,70	0,10	0,08
		0,06	

Fonte: Do Autor (2016)

Na Figura 29 pode-se observar um comparativo dos percentuais de escorrimento em função da porcentagem de adição de cada tipo de aditivo estabilizante.

Figura 29 - Aditivo estabilizante x Escorrimento



Fonte: Do Autor (2016)

A partir dos resultados da Figura 29 verificou-se que as misturas com adição de lã de vidro e de fibra de celulose apresentaram resultados muito parecidos, com percentual de adição de, aproximadamente, 0,4 a 0,44% de aditivo para um escorrimento máximo de 0,3%, conforme mostrado na Figura 29.

A Tabela 9 mostra um resumo dos principais trabalhos que avaliaram a adição de aditivos estabilizantes alternativos nas misturas SMA. Estes dados podem ser utilizados para comparação dos resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 9 - Comparativo de resultados de outras pesquisas

Autor	Aditivo Estabilizante	Teor Ótimo de Aditivo, %
Blasius, (2016)	Lã de vidro	0,4
Vale, (2005)	Fibra de coco	0,5
Leal, (2012)	Bagaço de cana-de-açúcar	0,3
Valença, (2012)	Fibra de carauá	0,3
Reis et al, (2002)	Fibra inorgânica de vidro	0,3

Fonte: Do Autor (2016)

A partir dos dados da Tabela 9, percebe-se que a porcentagem de adição ótima de aditivo estabilizante obtida na presente pesquisa, encontra-se próxima aos valores obtidos em relação a outras pesquisas anteriormente realizadas com uso de outros aditivos estabilizantes em misturas SMA. Apesar de serem materiais diferentes do utilizado na presente pesquisa, optou-se por fazer a comparação de resultados de forma a mostrar que a lã de vidro se mostra tão eficiente quanto outros materiais alternativos.

Fazendo uma análise dos resultados apresentados na Tabela 9, e levando em consideração as diferentes naturezas dos materiais empregados, percebe-se que o percentual de aditivo estabilizante possui maior influência em relação a sua natureza, quanto ao valor de escoamento.

4. CONCLUSÕES

- O teor ótimo de ligante encontrado para a Faixa II da especificação técnica do DER-SP foi de 8%. Alguns fatores podem estar associados a esse alto teor de ligante; entre eles, o fator mais importante pode ser o alto teor de material fino presente na mistura SMA necessário para formar o mástique.
- O valor médio de resistência a tração por compressão diametral da mistura estudada foi de 0,91MPa; valor considerado acima do valor mínimo estabelecido pelo DER-SP.

- Com os resultados de resistência à tração obtidos, pode-se afirmar que a mistura SMA possui um comportamento dúctil devido ao mástique, rico em ligante, presente na mistura.
- O percentual de adição de lã de vidro foi de 0,4% para um escoamento máximo de 0,3% em massa; o teor de fibra de celulose obtido para o mesmo valor de escoamento foi de 0,44%.
- Aparentemente o percentual de aditivo estabilizante possui maior influência em relação a sua natureza, quanto ao valor de escoamento.
- Desta forma, a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o uso de lã de vidro como aditivo estabilizante para misturas SMA é viável do ponto de vista técnico. O uso desta fibra pode trazer tanto benefícios técnicos, devido à estabilização da mistura SMA, quanto econômicos, associados à redução de custos pois permitira a substituição das fibras de celulose, atualmente importadas da Europa por um subproduto da construção civil de baixo custo.
- Além dos benefícios citados, um benefício ambiental pode ser atingido devido à correta destinação deste subproduto obtido a partir da indústria da construção civil, o qual é, atualmente, descartado, muitas vezes sem a destinação correta.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Pesquisar o uso de outros aditivos alternativos à fibra de celulose para estabilização de misturas SMA, de preferência materiais descartados pela indústria.
- Realizar ensaios de módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente para a mistura SMA, com adição de lã de vidro, para verificar o desempenho mecânico da mistura.
- Verificar a influência da adição da lã de vidro em misturas SMA com granulometria diferente da utilizada no presente estudo.

5. REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12052**: Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891**: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro: 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: misturas asfálticas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6954**: lastro padrão - determinação da forma do material. Rio de Janeiro: 1989.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATI, J. A. P. e Soares, J. B. **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras. ABEDA. Rio de Janeiro, 501p, 2007.

CEN Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 18: Binder drainage. EN 12697-18, European Committee For Standardization, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. **Relatório Gerencial: SEST, SENAT**. Brasília, 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. DER-ET-P00/031. **Especificação Técnica: Concreto Asfáltico tipo SMA**. São Paulo, 2007.

EL-HAGE, Robert Becerra. **Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave**. 138p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LEAL, Cláudio Luiz Dias; CASTRO, Protasio Ferreira e. **Construção de um trecho experimental em SMA usando bagaço de cana-de-açúcar como aditivo**. Revista Vértices, Campos dos Goytacazes, v. 14, n. 3, p.71-84, 2012. Essentia Editora.

MIRANDA, H. ; BATISTA, F. ; ANTUNES, M. L. ; NEVES, J. **Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escoamento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18**. in: 7º Congresso Rodoviário Português, 2013, Lisboa. Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escoamento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-borracha**. 67p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

RAMOS, Kleberson de Oliveira. **Estudo Sobre Mistura Asfáltica Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) Para Pavimento Aeroportuário**. 196p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

REIS, R. M. I. M. **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2002.

SILVA, Patricia Barboza da. **Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S**. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo. **Boletim técnico nº 3 - O Uso de Fibras de Celulose em Pavimentação**. São Paulo: Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo, 2013. 5p.

VALE, A. C. ; CASAGRANDE, M. D. T. ; SOARES, J. B. . **Misturas Asfálticas do Tipo SMA com Fibra de Coco**. in: 38ª Reunião Anual de Pavimentação e 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2007, Manaus. Misturas asfálticas do tipo SMA com fibra de coco, 2007.

VALE, A. C. ; SOARES, J. B. . **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas Tipo SMA Confeccionadas na Faixa 0/12,5 da Norma Americana**. in: XIX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005, Recife. Estudo laboratorial de misturas asfálticas tipo SMA confeccionadas na faixa 0/12,5 da norma americana, 2005.

VALENÇA, Patricia de Magalhães Aragão. **Desempenho Mecânico De Misturas Asfálticas Do Tipo Stone Matrix Asphalt Com Uso De Fibras Amazônicas E Agregados De Resíduos De Construção E Demolição**. 114p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, 2012.